

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ตัวแปรที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณภาพของกระบวนการประกอบชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (HSA Swaging process) จะมีอยู่ 3 ประการ คือ ความเร็วของลูกบอล, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลูกบอลกับแผ่นฐาน (Base Plate) และวัสดุของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator arm) โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาถึงการยึดติดกันของชิ้นงาน และการเสียรูปของหัวอ่าน โดยจะพิจารณาจากค่าความต้านทาน โมเมนต์บิด (Retention Torque) และระยะการเคลื่อนที่บริเวณปลายแผ่นฐาน ตามลำดับ

4.1 การออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ได้ความเร็วของลูกบอล, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลูกบอลกับแผ่นฐาน และวัสดุของแขนหัวอ่าน/เขียน ที่เหมาะสม จะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง ลูกบอลกับแผ่นฐาน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริงระหว่าง ลูกบอลกับแผ่นฐาน ได้ว่ามีค่าเท่าไร ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) ระหว่างลูกบอลกับแผ่นฐาน 5 ค่า คือ 0.05, 0.08, 0.1, 0.12 และ 0.15 แล้วนำค่าความต้านทาน โมเมนต์บิด (Retention Torque) ที่ได้แต่ละการทดลอง มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากกระบวนการสเวจในกระบวนการทำงานจริง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลูกบอล กับแผ่นฐานที่เหมาะสม

กำหนดเงื่อนไข

- ค่า μ ระหว่าง ลูกบอล กับแผ่นฐาน 5 ค่า คือ 0.05, 0.08, 0.1, 0.12 และ 0.15
- ค่า μ ระหว่างแขนหัวอ่าน/เขียน กับแผ่นฐาน = 0.45
- ค่าความเร็วในการยิงบอล = 20 m/s

การทดลองที่ 2 จากการทดลองที่ 1 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างลูกบอลกับแผ่นฐาน (Base Plate) ที่เหมาะสม 3 ค่า ซึ่งจะนำมาทดลองในการทดลองที่ 2 เพื่อหาค่าความเร็วของลูกบอล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง ลูกบอล กับแผ่นฐานที่เหมาะสม กำหนดเงื่อนไข

- ค่า μ ระหว่าง ลูกบอล กับแผ่นฐาน 3 ค่า ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1
- ค่า μ ระหว่าง แขนหัวอ่าน/เขียน กับแผ่นฐาน = 0.45
- ค่าความเร็วของลูกบอล 6 ระดับ คือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 m/s

การทดลองที่ 3 เพื่อหาวัสดุของแขนหัวอ่าน/เขียน ที่เหมาะสม ซึ่งปัจจุบันวัสดุของแขนหัวอ่าน/เขียน คือ อลูมิเนียม (Aluminum) 6061-T6 จึงทำการทดสอบ อลูมิเนียม 5 ชนิด เรียงตามความแข็งแรง คือ 6063-T5, 6063-T6, 6061-T6, 7005-T6 และ 7005-T53 เพื่อหาว่าวัสดุชนิดใด ที่ทำให้ได้ค่าความต้านทาน โมเมนต์บิดสูง และการเปลี่ยนรูปร่างบริเวณปลายแผ่นฐาน ค่า ได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- ค่า μ ระหว่าง Ball กับแผ่นฐาน 1 ค่า ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2
- ค่าความเร็วในการยิงบอล 1 ระดับ ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2
- ค่า μ ระหว่างแขนหัวอ่าน/เขียน กับแผ่นฐาน = 0.45

4.2 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

ในการวิเคราะห์กระบวนการประกอบชุดประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (HSA Swaging Process) จะใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ และทำนายพฤติกรรม การเกิดความเค้น และความต้านทาน โมเมนต์ (Retention Torque) ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการ ซึ่งระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical Method) ชนิดหนึ่งที่ใช้ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) สำหรับปัญหาต่างๆในงานทางวิศวกรรมหรือวิทยาศาสตร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหานั้นภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกัน โดยรูปทรงของปัญหาอาจมีความซับซ้อน (Complex Geometry) เช่นใดก็ได้

ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการแบ่ง (Discretization) รูปทรงของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ย่อยๆ จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Equation) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวม (Assemble) สมการจากแต่ละเอลิเมนต์นี้เข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวม (Set of

Simultaneous Equation) ขนาดใหญ่ซึ่งอธิบายสถานะภาพโดยรวมของปัญหานั้น จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อ (Node) ต่างๆ ทั่วทั้งโดเมน (Domain) ของปัญหา โดยในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมาช่วยในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. ขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processor) เป็นการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา (Analysis) ซึ่งเป็นหัวใจของโปรแกรมที่ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประมวลผลเพื่อหาคำตอบ
3. ขั้นตอนของกระบวนการขั้นท้าย (Post-Processor) เป็นการวิเคราะห์และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

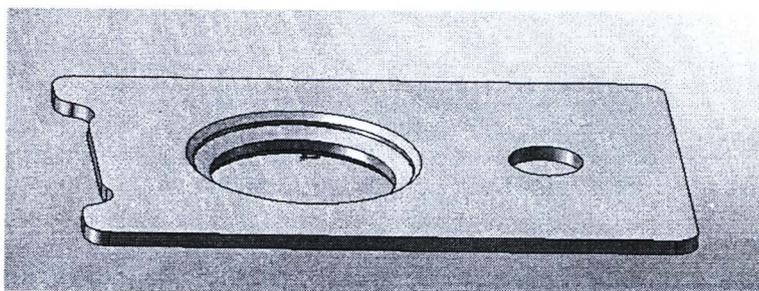
4.3 ขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processor)



4.3.1 การสร้างแบบจำลอง

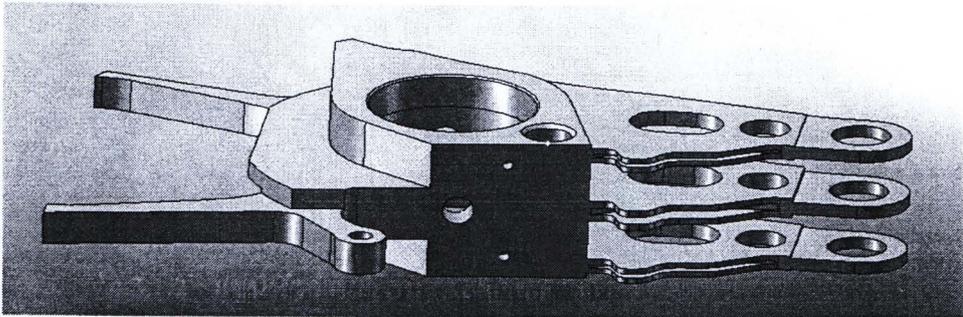
ในขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ คือ การสร้างแบบจำลองจะประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนต่างๆ ให้เหมือนกับชิ้นส่วนจริง ทั้งทางกายภาพและการกำหนดสถานะเงื่อนไขให้สอดคล้องกับทางปฏิบัติ โดยชิ้นส่วนต่างๆ ที่จะทำการวิเคราะห์มี ดังนี้

4.3.1.2 แผ่นฐาน (Base Plate) ดังภาพที่ 26 โดยมีหน้าที่เชื่อมต่อกับชุดรองรับหัวอ่าน/เขียนข้อมูล ส่วนล่างของแผ่นฐาน จะมีลักษณะคล้ายๆ ปลอกที่มีขนาดเล็กกว่ารูของแขนหัวอ่าน/เขียนเล็กน้อย เพื่อให้ลูกบอลสเวจ เคลื่อนผ่านรูแล้วอัดปลอกของแผ่นฐาน ให้ยึดติดกับผนังรูของแขนหัวอ่าน/เขียน โดยแผ่นฐาน ทำมาจาก UNS S30500



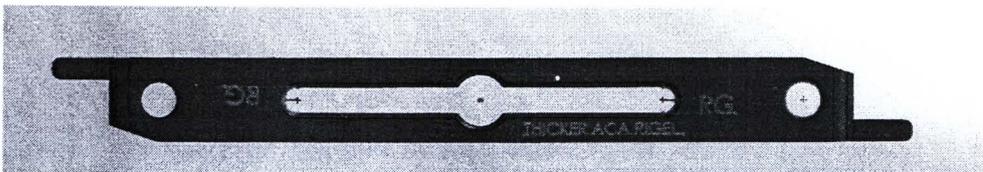
ภาพที่ 26 ลักษณะรูปร่างของแผ่นฐาน (Base Plate)

4.3.1.2 แขนหัวอ่านเขียน (Actuator arm) ดังภาพที่ 27 จะทำหน้าที่รองรับหัวอ่าน/เขียน (HGA) โดยจะประกบยึดแน่นกับแผ่นฐาน หลังจากผ่านกระบวนการสเวจ แขนหัวอ่าน/เขียนจะมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งกว่าชิ้นส่วนอื่นๆ เนื่องจากต้องสามารถรับภาระจากน้ำหนักของอุปกรณ์ที่นำมายึดติด และต้องรับแรงในการสเวจได้ดีด้วย ซึ่งในปัจจุบันวัสดุของแขนหัวอ่าน/เขียน ผลิตจาก อลูมิเนียม 6061-T6



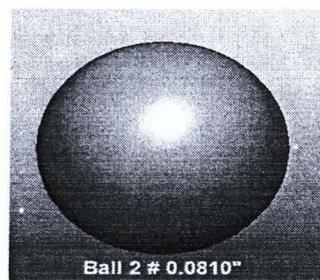
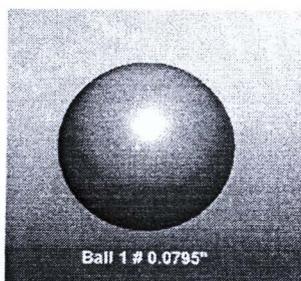
ภาพที่ 27 ลักษณะของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator arm)

4.3.1.3 ชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียนในแต่ละหัวอ่าน (Key) มีหน้าที่ในการรองรับแรงกด และยึดให้แขนแต่ละหัวอ่านให้อยู่กับที่ ในระหว่างกระบวนการสเวจ แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ลักษณะชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียนในแต่ละหัวอ่าน (Key)

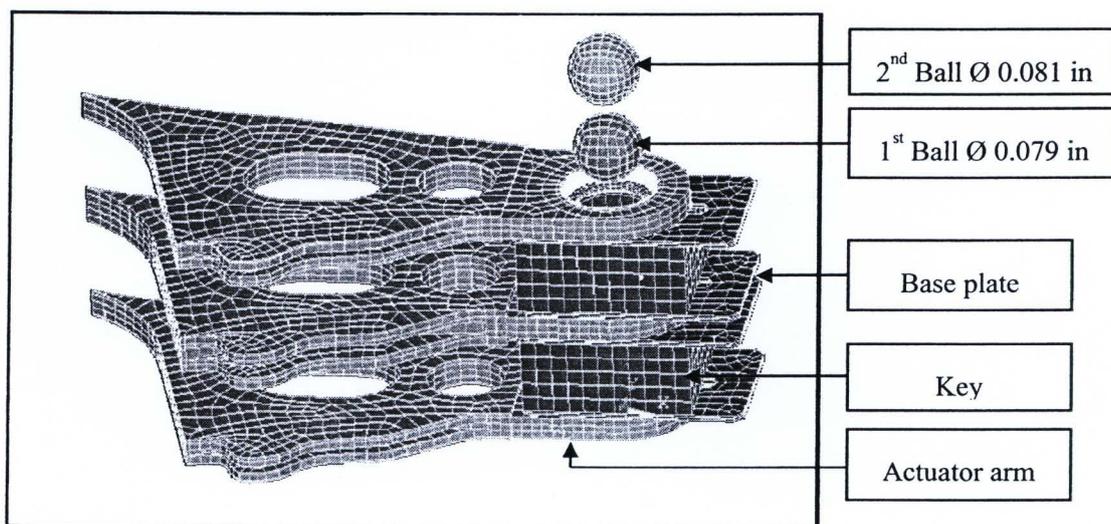
4.3.1.4 ลูกบอล ในกระบวนการสเวจ จะใช้ลูกบอล 2 ลูก ที่มีขนาดแตกต่างกันไป ดังภาพที่ 29 โดยลูกบอลทำมาจาก Stainless steel 440 (SST 440C)



ภาพที่ 29 ลูกบอลที่ใช้ในกระบวนการสเวจ ทั้ง 2 ลูก

4.3.2 การแบ่งเอลิเมนต์

เนื่องจากการวิเคราะห์กระบวนการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (HSA Swaging Process) เป็นปัญหาเกี่ยวกับการตกกระแทก (Impact), การชนกัน (Crash) จึงใช้การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Explicit Dynamic Analysis เพราะมีความสามารถในการคำนวณแม่นยำ ลดเวลาการคำนวณ ปัญหาขนาดใหญ่ และสามารถกำหนดผิวสัมผัส (Contact Surface) ได้สะดวก ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์กระบวนการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ (HSA Swaging Process) โดยจะใช้โดยการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนต่างๆ จะมีรูปแบบ 3 มิติ ซึ่งจะแบ่งเอลิเมนต์ (Element) เป็นแบบรูปลูกบาศก์ที่ไม่มีโหนดตรงกลางด้าน เนื่องจากใช้การวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamic Analysis จะไม่ยอมให้มีโหนดตรงกลาง โดยชิ้นส่วนของลูกบอลนั้นจะกำหนดให้เป็นชิ้นส่วนแข็งเกร็ง (Rigid) เนื่องจากลูกบอลมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอื่นๆ โดยทุกชิ้นส่วนที่นำมาวิเคราะห์ ถูกแบ่งเอลิเมนต์แบบทรงตัน (Solid Element) ซึ่งมีโหนดทั้งหมด 8 โหนด หลังจากทำการแบ่งเอลิเมนต์แล้วนำแต่ละชิ้นส่วนมาประกอบกันจะได้ดังภาพที่ 30 โดยในชิ้นส่วนของแขนหัวอ่าน/เขียนและชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียน (Key) จะถูกตัดออกบางส่วนเพื่อประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการศึกษาเรามุ่งเน้นวิเคราะห์หาค่ายึดติดระหว่างชิ้นส่วนแผ่นฐาน (Base plate) กับแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm)



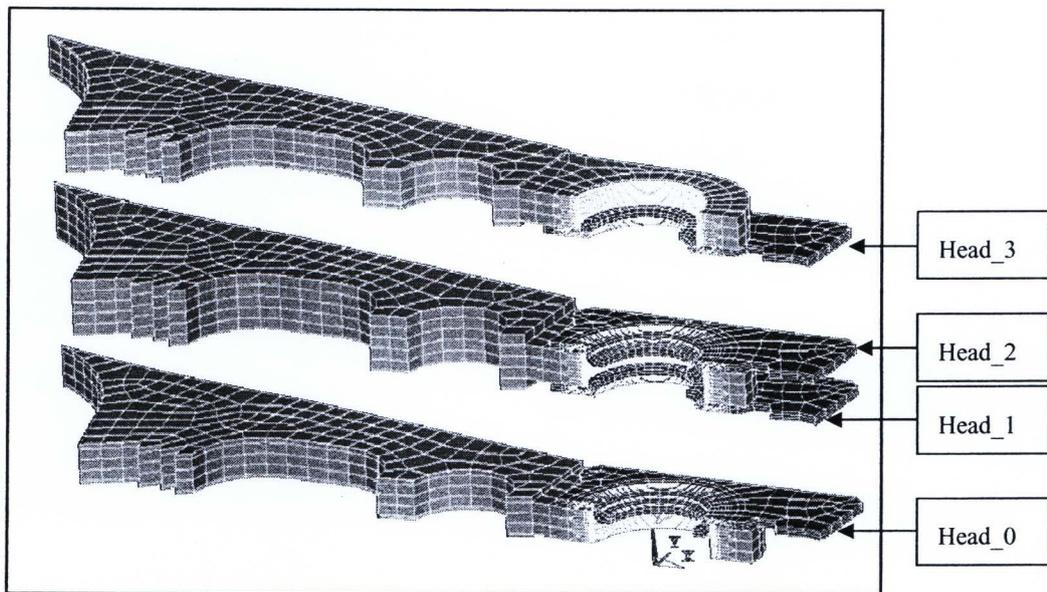
ภาพที่ 30 แบบจำลอง 3 มิติหลังจากการแบ่งเอลิเมนต์

โดยแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator arm) จะแบ่งเป็น 3 แขน และมีการประกอบกับแผ่นฐานในแต่ละแขนแตกต่างกันไปดังภาพที่ 31 ได้แก่

2.1 แขนบน ชั้นส่วนของแผ่นฐาน จะประกอบอยู่ด้านล่างของแขนหัวอ่าน/เขียน

2.2 แขนกลาง จะมีชั้นส่วนของแผ่นฐาน ประกอบอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของแขนหัวอ่าน/เขียน

2.3 แขนล่าง ชั้นส่วนของแผ่นฐาน จะประกอบอยู่ด้านบนของแขนหัวอ่าน/เขียน



ภาพที่ 31 ลักษณะการประกอบกันระหว่างแขนหัวอ่าน/เขียน กับแผ่นฐาน ในแต่ละแขน

4.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

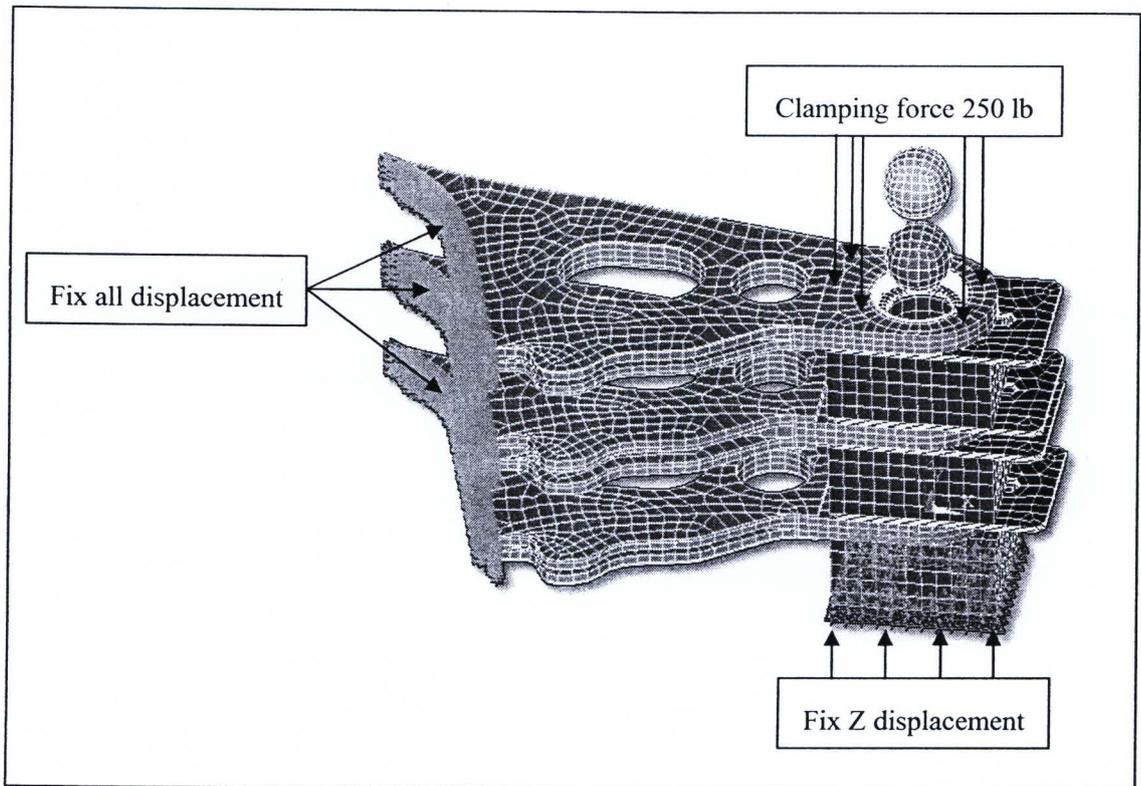
การกำหนดเงื่อนไขขอบในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้สอดคล้องและใกล้เคียงกับลักษณะของกระบวนการจริงมากที่สุด ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบของแต่ละชั้นส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1 ลูกบอล กำหนดให้มีความเร็วคงที่ตลอดช่วงเวลาของกระบวนการ ซึ่งในกระบวนการประกอบจริงนั้น จะมีเข็ม (Driving pin) ดันลูกบอลจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นฐาน โดยจะดันด้วยความเร็วคงที่ และลูกบอลจะถูกกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกรง เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเน้นถึงการเสีรูปร่างของลูกบอล

4.3.3.2 แขนหัวอ่าน/เขียน เมื่อพิจารณาจากกระบวนการ จะพบว่าระยะทางกึ่งกลางตามยาวและระยะทางที่ตั้งฉากกับความยาวของแขนหัวอ่าน/เขียนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจะมีแรงกด (Clamping force) เพื่อไม่ให้มีการเคลื่อนที่ตลอดกระบวนการ ในการวิเคราะห์จึงสามารถ

ลดขนาด ของแบบจำลองแขนหัวอ่าน/เขียนตรงส่วนต้นแขนออกและกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนในทุกทิศทาง (fix all displacement) ที่บริเวณต้นของแขนหัวอ่าน/เขียน และกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน (fix Z displacement) บริเวณด้านล่างของแขนหัวอ่าน/เขียน ดังภาพที่ 32

4.3.3.3 แรงจับยึด (Clamping force) บริเวณด้านบนส่วนของปลายแขนหัวอ่าน/เขียนจะมีแรงกดแบบกระจาย โดยมีขนาด 250 lb กระจายรอบๆ รูของแผ่นฐาน สำหรับยิงบอล ดังภาพที่ 32 เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของชิ้นงาน ในขณะที่ยิงลูกบอล



ภาพที่ 32 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.3.3.4 การกำหนดการสัมผัสระหว่างชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้กำหนดทุกชิ้นงานที่มีส่วนสัมผัสกัน โดยกำหนดให้เป็นการสัมผัสเป็นแบบ Automatic Single Surface Contact ซึ่งในแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์มีชิ้นส่วนสัมผัสกัน ดังนี้

- ลูกบอลกับแผ่นฐาน
- แผ่นฐานกับแขนหัวอ่าน/เขียน
- ชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียน ในแต่ละหัวอ่านกับแขนหัวอ่าน/เขียน

4.3.3.5 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material property) ชิ้นส่วนแผ่นฐาน (Base plate), แขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) และ ชิ้นส่วนรองแขนหัวอ่าน/เขียนในแต่ละหัวอ่าน (Key) ได้ถูกกำหนดแบบ Bilinear isotropic hardening elastic-plastic material เพราะเป็นไปตามพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ และเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบ Explicit Dynamic Analysis โดยพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ถูกกำหนดแบบ Bilinear isotropic hardening elastic-plastic material แสดงในภาคผนวก ก ส่วนลูกบอล ได้กำหนดแบบวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid bodies to expedite the simulation) เนื่องจากลูกบอลมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่น การกำหนดคุณสมบัติโครงสร้างของวัสดุแต่ละชิ้นส่วนแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 1 แสดงการกำหนดวัสดุและคุณสมบัติของแต่ละชิ้นส่วน

ชิ้นส่วน	วัสดุ	Modulus of Elasticity (GPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Tensile Yield Strength (MPa)	Density (g/cm ³)	Poisson's Ratio
Ball	SST440C	212	1500*	1000*	8.03	0.30
Base Plate	UNS S30500	212	550	205	8.03	0.30
Key	UNS S30500	212	550	205	8.03	0.30
Arm	Aluminum 6063-T5	69	185	145	2.70	0.33
	Aluminum 6063-T6	69	240	215	2.70	0.33
	Aluminum 6061-T6	69	310	275	2.70	0.33
	Aluminum 7005-T6	72.0	350	290	2.78	0.33
	Aluminum 7005-T53	72.0	395	350	2.77	0.33

* กำหนดให้ชิ้นส่วนของลูกบอลเป็นวัสดุแข็งเกร็ง

4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา (Analysis)

ขั้นตอนนี้จัดเป็นหัวใจของการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมาช่วยในการคำนวณวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทั่วไป เป็นขั้นตอนการคำนวณซึ่งเกิดจากการประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ค่อนข้างซับซ้อน อันเป็นผลมาจากการประยุกต์ระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) เข้ากับระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ร่วมกับการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) นั้น กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย การอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) ก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้จะประกอบรวมกันเข้าเป็นระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหานั้น แล้วแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ที่ได้นี้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการประมวลผลแบบ Explicit Dynamic Analysis โดยจะกล่าวรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

การคำนวณโดยวิธี แบบ Explicit Dynamic Analysis เป็นการคิดสมมูลพลวัตที่เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$[M][\ddot{u}^{(i)}] = [F^{(i)}] - [I^{(i)}] \quad (4.1)$$

เมื่อ $[M]$ คือ เมทริกซ์ของมวล, F คือเวกเตอร์ของภาระที่มากระทำ และ I คือเวกเตอร์ของแรงภายใน ซึ่งวิธีในการคำนวณเพื่อหาความเร่งของมวลในแต่ละเอลิเมนต์ที่เวลาต่างๆ จะใช้ระเบียบวิธีผลต่างตรงกลาง (Central Difference Method) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \ddot{u}^{(i)} &= \frac{1}{\Delta t^2} (u^{(i+1)} - 2u^{(i)} + u^{(i-1)}) \\ \dot{u}^{(i)} &= \frac{1}{2\Delta t} (u^{(i+1)} - u^{(i-1)}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

โดยความเสถียรของกระบวนการคำนวณขึ้นอยู่กับ การแบ่งเวลาออกเป็นช่วงย่อย (Stable Time Increment) ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta t_{stable} = \min \left(\frac{L_c}{c} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ L_c คือมิติจำเพาะของเอลิเมนต์ และ C คือความเร็วของ Longitudinal Wave โดยเวลาที่ได้จากสมการ (4.3) จะเป็นเวลาที่คลื่นสามารถเคลื่อนผ่านได้เพียงเอลิเมนต์เดียวเท่านั้น ในทางปฏิบัติการแต่ช่วงเวลาในการคำนวณ (Δt_{Actual}) จะน้อยกว่าช่วงเวลาย่อยที่ทำให้การคำนวณมีความเสถียรเล็กน้อย โดยพิจารณาจาก Courant number, C_n ซึ่งนิยามโดย

$$C_n = \frac{\Delta t_{Actual}}{\Delta t_{stable}} \quad (4.4)$$

ในกระบวนการคำนวณจะใช้ค่า *Courant number* ในช่วงระหว่าง 0.95-0.98 [20] การเพิ่มช่วงเวลาย่อยสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ หรือการกำหนดขนาดของมวล (Mass Scaling) ที่เหมาะสมในการคำนวณ ซึ่งขนาดของมวล ที่กำหนดจะมีความเหมาะสมหรือไม่ จะต้องพิจารณาจากพลังงานภายใน (Internal Energy, IE) เปรียบเทียบกับพลังงานจลน์ (Kinetic Energy, KE) ของชิ้นส่วนที่มีการเปลี่ยนรูปในแบบจำลอง โดยสัดส่วนของพลังงานจลน์ จะต้องอยู่ระหว่าง 5 – 10 % ของพลังงานภายในตลอดช่วงการวิเคราะห์